

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО"**

КОТЕНКО СВІТЛАНА ГЕННАДІЇВНА

УДК 534.2

**ЗНИЖЕННЯ РІВНІВ ШУМУ РУХОМИХ ДЖЕРЕЛ ЗАХИСНИМИ
ЕКРАНАМИ ЗІ СКІНЧЕНОЮ ЗВУКОІЗОЛЯЦІЄЮ**

Спеціальність 05.09.08 – Прикладна акустика та звукотехніка

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі акустики та акустoeлектроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник - доктор технічних наук, професор

Дідковський Віталій Семенович,

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
завідувач кафедри акустики та акустoeлектроніки.

Офіційні опоненти: - доктор технічних наук, професор

Сокол Галина Іванівна,

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, професор кафедри механотроніки;
кандидат технічних наук, доцент

Мелешко Микола Андрійович, Національний авіаційний університет , професор кафедри комп'ютерних мультимедійних технологій.

Захист відбудеться « » червня 2019 р. о 1_-30 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.19 в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою 03056, м. Київ-56, просп. Перемоги, 37, корп. 12, ауд. 412.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою:
03056, м. Київ-56, просп. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий « » травня 2019 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

В.Б. Швайченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Кожного дня все більше уваги приділяється якості життя людини, та його здоров'ю. Одним із факторів впливу на стан здоров'я людини є шум та його надмірні рівні. В умовах міста джерелом всепроникного та нав'язливого шуму є рухомі джерела, такі як легкові та вантажні автомобілі, потяги тощо. Тому задача із захисту від транспортного шуму має глобальний характер. В наш час в провідних країнах світу приділяється велика увага будівництву нових та реконструкції транспортних магістралей, що існують, для збільшення інтенсивності транспортних перевезень та покращенню безпеки експлуатації. Однією з вимог по безпечній експлуатації будь-яких будівельних об'єктів, до яких безперечно входять й автомобільні та залізничні шляхи, є вимога «захист від шуму». В державних нормативних документах вказано про необхідність застосування шумозахисних екранів (ШЗЕ), як дієвого способу зниження шуму транспортних потоків. В Україні методика розрахунку ефективності таких екранів є досить застарілою та не відповідає сучасним потребам в точності та надійності.

Питаннями оцінки та розрахунку ефективності шумозахисних екранів активно почали займатися в кінці XIX на початку XX століття, користуючись знаннями набутими в оптиці. Такими вченими були Френель, Кірхгоф, Макдональд. В 40-х роках XX століттях набула широкого поширення теорія Редферна яка базувалася на знаходженні дифракції при розсіянні поля плоскої хвилі на клині у вільному просторі. В 60-х роках Маекава провів експериментальні дослідження, на базі яких подано вираз для знаходження ефективності шумозахисних екранів. Даний вираз в подальшому багато разів удосконалювався. Серед робіт останніх десятиліть вирізняються роботи U.Kurtz, J.Anderson, і P.Menouenu. В Україні за останні десятиліття питаннями розрахунку поля довкола екранів займалися І. Вовк, В. Грінченко, В. Маципура, В. Дідковський. Ці дослідження базувалися на використанні метода часткових областей для знаходження поля довкола екрана .

Незважаючи на велику кількість публікацій задача достовірної оцінки ефективності екранів лишається важливою та *актуальною*.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційну роботу виконано на кафедрі акустики та акустoeлектроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» в рамках науково-дослідної роботи Держбюджетна тема № 2119-п «Розробка неінвазивної пасивної акустичної системи нового покоління для вимірювання критичних фізіологічних параметрів головного мозку та внутрішнього вуха людини» (номер державної реєстрації - № 0118U003533) та НДР «Дослідження розповсюдження звукових хвиль в архітектурних об'єктах, складної форми» (ДР № 0116U006404).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є встановлення закономірностей залежності ефективності шумозахисних екранів від

конструктивних параметрів та геометричного розташування і пошук шляхів підвищення ефективності шумозахисних екранів.

Для досягнення поставленої мети розв'язані наступні завдання.

1. Розроблені розрахункові моделі шумозахисних екранів для зниження шуму від рухомих джерел звуку з урахуванням їх геометричних розмірів та місця встановлення;

2. Отримані аналітичні співвідношення для визначення акустичних полів довкола шумозахисного екрану з урахуванням проникнення звуку крізь тіло екрану на основі методу кінцевих областей.

3. Проведені дослідження характеристик акустичних полів від джерел звуку, що створюють циліндричну хвилю і вивченні закономірності їх зміни в залежності від характеристик конструкцій шумозахисних екранів.

4. Експериментальне підтверджена відповідність запропонованих математичних, комп'ютерних моделей та розрахункових моделей з реальними значеннями звукового тиску.

5. Надана фізична інтерпретація встановлених закономірностей і розроблені на її основі конкретні рекомендації з проектування шумозахисних екранів.

Об'єктом дослідження є явище зниження рівнів звукового тиску шумозахисними екранами різної конструкції.

Предметом дослідження є акустичні властивості шумозахисних екранів.

Методи дослідження. Дослідження, що викладені в роботі ґрунтуються на аналітичному розв'язанні задач математичної фізики для розв'язання хвильового рівняння з метою знаходження акустичних полів довкола шумозахисних екранів різного типу з використанням методу часткових областей. Чисельні дослідження базувалися на використанні методу кінцевих елементів. Для оцінки точності результатів розрахунків були проведені натурні вимірювання за стандартними методиками.

Наукова новизна одержаних результатів:

1) вперше поставлена та розв'язана задача знаходження ефективності шумозахисного екрана зі щілиною в його основі;

2) вперше поставлена та розв'язана задача знаходження звукового поля довкола шумозахисного екрана зі щілиною в довільному місці;

3) вперше запропоновано модель шумозахисного екрану з багатьма щілинами та скінченою звукоізоляцією;

4) удосконалено комп'ютерну модель шумозахисного екрану для знаходження рівнів звукового тиску рухомого джерела звуку довкола шумозахисного екрана за допомогою метода кінцевих елементів;

5) одержані *якісні* оцінки ефективності шумозахисних екранів зі скінченою звукоізоляцією в широкому діапазоні частот.

Практичне значення одержаних результатів полягає в наступному:

1. показана можливість використання шумозахисних екранів зі щілиною;

2. встановлено кількісні зв'язки між геометричними й фізичними параметрами шумозахисного екрана та його ефективністю;

3. розроблено алгоритми розрахунку шумозахисних екранів різного типу, та більшість з яких впровадженні в реальних проектах;
4. розроблене відповідне програмне забезпечення
5. розроблені практичні рекомендації щодо створення нормативної бази для проектування шумозахисних екранів в Україні.
6. за результатами експериментальних досліджень встановлено що щільність не впливає на ефективність екрану, якщо її розмір менше $\frac{1}{4}$ довжини хвилі.

Результати роботи були впроваджені в виконаних акустичних проектах:

- акустичний проект зниження рівнів шуму автодороги Н-01 в межах Київ-Знамянка, 14+740 – км 43+345, Київська обл., за допомогою шумозахисних екранів виконаний на замовлення ДП «Укрдіпродор»;

- акустичний проект зниження рівнів шуму автодороги Київ-Одеса в ж/м Теремки в м. Київ за допомогою шумозахисних екранів виконаний на замовлення ТОВ «Торговий дім «Завод ЄВРОФОРМАТ»;

- рекомендації по зниженню шуму залізничного транспорту на території об'єкта "Будівництво багатоквартирних житлових будинків по вул. Джерельній, 69 у м. Львові зі знесенням існуючих споруд" для захисту від шуму ЖК «Бельгійське містечко» за допомогою шумозахисного екрана. Замовлення ТОВ «Галіція Апартаментс», виконано у ДП НДІБК.

- звіт за результатами натурних вимірювань рівнів шуму на території за адресою вул. Ніжинська, 9 в м. Харків та розрахунків очікуваних рівнів шуму при встановленні шумозахисних екранів на замовлення ТОВ «ПОЛЮС»;

- рекомендації зі зниження шуму від автотранспорту уздовж кільцевої дороги, для захисту від шуму отельного комплексу вулиця Дмитрова, 2в, Софіївська Борщагівка, Києво-Святошинського району, Київської обл. Замовник БК «МВС»

- акустичний проект захисту від шуму «Проект подовження вул. Суздальської до просп. Повітрофлотського з будівництвом шляхопроводу через залізничні колії» на замовлення ТОВ «Інститут комплексного проектування об'єктів будівництва»;

Отриманні результати можуть бути використанні при розробленні нормативних документів в галузі будівельної акустики та захисту від шуму, в інженерній практиці та навчальному процесі зокрема в КПІ ім. Ігоря Сікорського та в НТУ «ХПІ» на кафедрах акустичного спрямування.

Особистий внесок здобувача.

В одержанні наукових та практичних результатів, що викладені в дисертаційній роботі, автору належать постановка та розв'язок задач [1, 4-6, 8-10], проведення чисельних досліджень [2,3,7], систематизований аналіз результатів та їх фізичне трактування. В патентах [10, 11] здобувач виконав модельні розрахунки та провів аналіз отриманих результатів.

Дисертаційна робота виконана на кафедрі акустики та акустoeлектроніки факультету електроніки Національного технічного

університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» під керівництвом доктора технічних наук, професора Дідковського В.С.

Робота є результатом самостійних досліджень Котенко С.Г.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертації обговорювались на:

1. Третя міжнародна науково-технічна конференція Інформаційні проблеми теорії акустичних, радіоелектронних і телекомунікаційних систем IPST-2014. м. Харків 21-23 жовтня 2014 р.

2. VIII Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених "Електроніка-2015» ELCONF-2015. м.Київ, 15-17 квітня 2015.

3. IV Міжнародна конференція «Інформаційні проблеми теорії акустичних, радіоелектронних і телекомунікаційних систем» ІПТС-2015. м. Харків, 04-06 вересня 2015.

4. 13 Міжнародний форум будівництва, експлуатації, проектування автомобільних доріг та мостів «АВТОДОРЕКСПО-2015», м.Київ, 27.11.2015.

5. XLII Міжнародна науково-практична конференція ПРІОРИТЕТНІ НАПРЯМИ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ, м.Чернівці 15-16 червня 2016.

6. 14 Міжнародний форум будівництва, експлуатації, проектування автомобільних доріг та мостів «АВТОДОРЕКСПО-2016», м.Київ, 30.11.2016.

7. II Міжнародній науково-практичній конференції «Перспективні шляхи розвитку наукових знань », м. Київ, 26-27 січня 2019.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 12 робіт, серед них 7 статей у наукових фахових виданнях, з них 2 включено до міжнародних наукометричних баз даних; 2 патенти України на корисну модель, 3 тези доповідей в збірниках і матеріалах конференцій.

Структура та об'єм дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних літературних джерел із 116 найменувань та 5 додатків. Робота містить 48 рисунків та 6 таблиць. Загальний обсяг дисертаційної роботи складає 172 сторінки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано вибір теми наукових досліджень, наведена актуальність роботи, сформульовано мету та поставлено задачі дослідження описано наукову новизну роботи та практичне значення отриманих результатів наведено перелік проектів по практичному впровадженню результатів, наведено дані щодо апробації результатів роботи.

В **першому розділі** розглянуто та класифіковано методи зниження шуму, наведено ефективність застосування кожного з методу та сферу застосування. Показано що для зниження шуму рухомих джерел звуку таких як транспорт, найбільш ефективним є застосування шумозахисних екранів.

В цьому ж розділі наведено існуючі методи розрахунку ефективності шумозахисних екранів виокремлено найбільш вагомні параметри, що впливають на величину зниження рівнів шуму.

Так серед існуючих методів розглянуто метод Зоммерфельда – Макдональда з наближенням Каваї. Даний метод базується на точному методі розв'язку задачі дифракції для випадку падіння плоскої хвилі на напівнескінченний тонкий жорсткий екран.

У 40-х роках XX сторіччя С. Редферн запропонував метод розрахунку акустичної ефективності шумозахисних екранів, встановленого в умовах вільного простору, на підставі класичної теорії дифракції для плоскої хвилі. Графіки Редферна дозволяють визначити зменшення звукового тиску, що досягається в зоні акустичної тіні жорсткого екрану як функцію відношення ефективної висоти екрана h_{ef} до довжини звукової хвилі.

В свою чергу Реттінгер, запропонував для розрахунку акустичної ефективності акустичного екрану наступну формулу:

$$\Delta L = 10 \lg \left[(0,5 - x)^2 + (0,5 - y)^2 \right] - 3, \quad (1)$$

де x - та y - функції, які визначаються за таблицями інтегралів Френеля залежно від величини ω :

$$\omega = \frac{1,41 \cdot h}{\sqrt{\lambda}} \cdot \sqrt{\frac{a+b}{ab}}, \quad (2)$$

де h - різниця висот шумозахисного екрану і акустичного центру джерела шуму;

a - відстань по горизонталі від акустичного центру джерела шуму до екрану;

b - відстань від шумозахисного екрану до розрахункової точки;

λ - довжина звукової хвилі.

Метод Реттінгера досить трудомісткий, вимагає великої кількості обчислень, кропіткої графічної побудови профілів, що зображують джерело шуму, шумозахисний екран і розрахункову точку, і не дає акустичної ефективності шумозахисного екрану безпосередньо в дБА.

На підставі аналізу експериментальних кривих і аналітичних даних З. Маєкава запропонував наступну досить просту формулу для розрахунку напівнескінченних шумозахисних екранів, розташованих у вільному просторі при ненаправленому точковому джерелі шуму:

$$\Delta L_{1/2} = 10 \lg(20N), \text{дБ}. \quad (3)$$

З. Маєкава довів, що вираз (3) є першим членом асимптотичної формули, виведеної Келлером для напівнескінченних шумозахисних екранів.

Даний вираз знайшов широке застосування при проектуванні шумозахисних екранів в різних країнах світу.

Крім аналітичних та експериментальних методів розрахунку ефективності шумозахисних екранів розглянуто й числові методи, а саме метод кінцевих елементів та метод граничних областей, що в останній час знайшли широке застосування у зв'язку з розвитком комп'ютерної техніки.

Однак всі розглянуті методи мали свої недоліки (табл. 1)

Таблиця 1 Недоліки існуючих методів розрахунку ШЗЕ

Метод	Недолік
Зоммерфельда – Макдональда	Застосовується лише для точкового джерела звуку у вільному полі
Редферна	Невідповідність результатів для великих кутів дифракції
Інтегральних виразів	Застосовується лише для розрахунку ефективності екранів, розміри яких в порівнянні з довжиною звукової хвилі є малі.
Реттінгера	Трудомісткий, вимагає великої кількості обчислень, кропіткої графічної побудови профілів, що зображують джерело шуму, шумозахисний екран і розрахункову точку.
Келлера	Метод не забезпечує достатньої точності розрахунків
Маєкава	Можливість його застосування лише для точок вище рівня дороги. Базується на експериментальних даних
Метод кінцевих елементів (запропонований автором)	Чисельний метод із невідомою наперед точністю
Метод граничних елементів (запропонований автором)	Числовий метод з можливістю розрахунку до 500 Гц.

Жодний з цих методів не враховує звукоізоляцію екранів.

Таким чином, в першому розділі проведений порівняльний аналіз існуючих аналітичних методів визначення ефективності шумозахисних екранів, та визначено необхідність розробки методу розрахунку шумозахисних екранів, що усувають недоліки наведених.

Другий розділ присвячено дослідженню впливу швидкості руху джерела звуку на ефективність екрану та оцінці звукоізоляції різних конструкцій екрану.

Для прямолінійного і рівномірного руху джерела звуку (ДЗ) (рис. 1) зі швидкістю значно меншою швидкості звуку в повітрі було знайдено, що амплітуда звукового тиску визначається відповідно до виразу:

$$p \left(t + \frac{\sqrt{(x_0 + v \cdot t)^2 + l^2}}{c} \right) = p_0 \cdot \frac{1}{\sqrt{(x_0 + v \cdot t)^2 + l^2}} \quad (4)$$

де p_0 – амплітуда звукового тиску на відстані 1 м;

x_0 – проекція відстані між джерелом звуку та розрахунковою точкою на напрямок руху в час $t = 0$;

l – найменша відстань між джерелом звуку та розрахунковою точкою;

v – швидкість джерела звуку

c – швидкість звуку в повітрі.

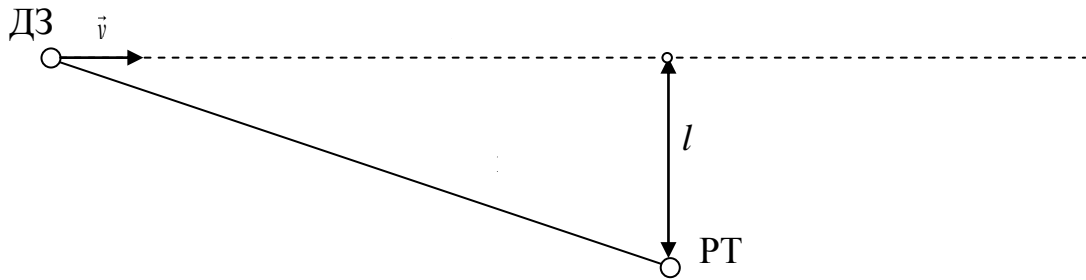
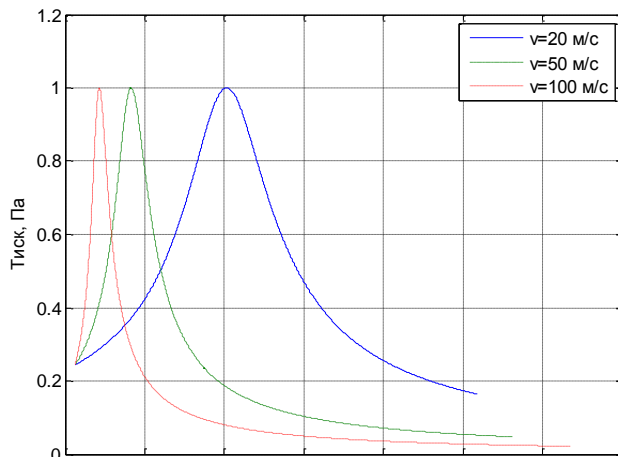


Рисунок 1 – Залежність звукового тиску в розрахунковій точці (РТ) від часу за різних швидкостей v ($x_0 = -200\text{ м}$, $l = 50\text{ м}$)

За отриманим виразом (3) побудовані часові залежності зміни амплітуди звукового тиску з часом (рис.2).



Як видно з рисунка швидкість джерела звуку не впливає на максимальне значення звукового тиску. Однак, відповідно до відомого ефекту Допплера, швидкість джерела звуку призведе до зміни частоти що спостерігається в нерухомій розрахунковій точці:

Рисунок 2 – Залежність звукового тиску в розрахунковій точці від часу за різних швидкостей v ($x_0 = -200\text{ м}$, $l = 50\text{ м}$)

$$f\left(t + \frac{\sqrt{(x_0 + v \cdot t)^2 + l^2}}{c}\right) = f_0 \frac{1}{1 - \frac{v}{c} \frac{(x_0 + v \cdot t)}{\sqrt{(x_0 + v \cdot t)^2 + l^2}}}, \quad (5)$$

де f_0 - частота звуку нерухомого джерела.

За отриманим виразом (9) побудовані часові залежності зміни частоти що спостерігаються в розрахунковій точці.

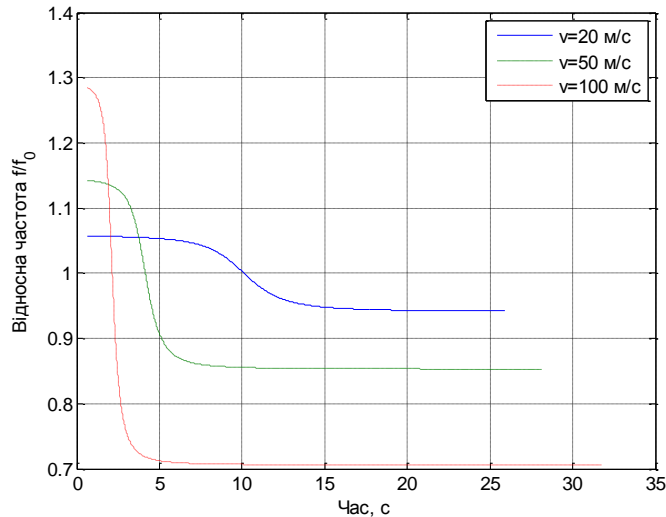


Рисунок 3 Залежність відносної частоти в розрахунковій точці від часу за різних швидкостей v ($x_0 = 200$ м, $l = 50$ м)

Розрахунки показують, що зміна частоти звуку збільшується зі збільшенням швидкості руху і для швидкостей 180 км/год (50 м/с) ця зміна становить 30% від частоти звуку нерухомого джерела. Даний факт впливає на ефективність шумозахисних екранів, які застосовують для зниження шуму рухомих джерел, таких як транспортні потоки.

Якщо скористатися виразом (3) як одним із найбільш застосовуваних для знаходження ефективності екрану, то можемо побачити що при зміні частоти звуку на 30% ефективність екрана змінюється лише на 1,1 дБ. Тобто, навіть для швидкостей понад 180 км/год ефект Доплера має незначний вплив на ефективність екрану.

З урахуванням того, що в переважній більшості транспортні потоки, вздовж яких влаштовують шумозахисні екрани рухаються в обидва боки, то вплив ефекту Доплера на ефективність екрану практично нівелюється.

В другій частині розділу 2 розглянуто оцінку звукоізоляції різних конструкцій екрану.

Для розрахунку звукових полів без екрану і з екраном використаний чисельний метод кінцевих елементів. В ході числового експерименту розглядалися наступні екрани:

- екран зі сталі товщиною 1 мм, 2 мм, 5 мм;
- екран з литого полікарбонату товщиною 5 мм, 10 мм, 20 мм;
- екрани з цегли завтовшки 125 мм і 250 мм.

Для порівняння отриманих результатів за основний був обраний абсолютно жорсткий екран з нескінченної звукоізоляцією завтовшки 10 мм.

Результати розрахунку показані на рисунку 4.

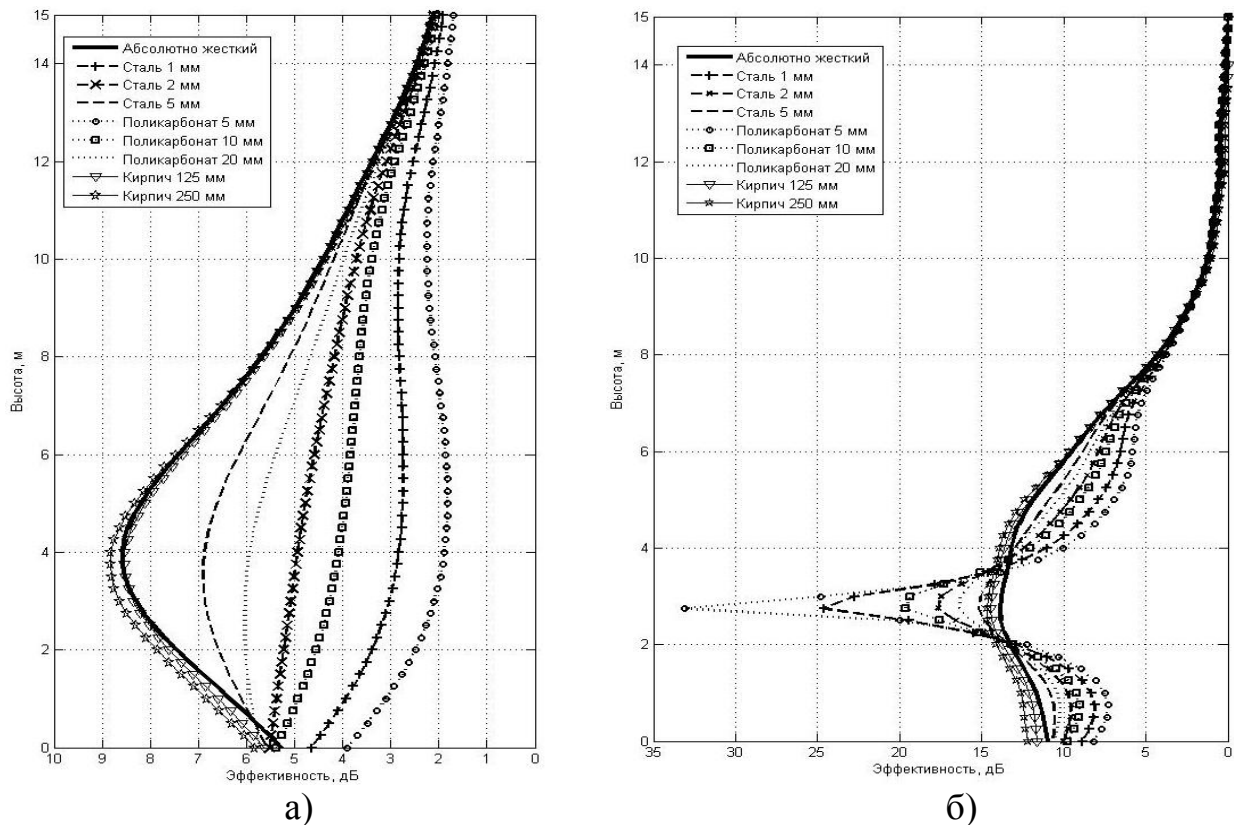


Рисунок 4 – Зміна рівнів звукового тиску після встановлення екранів різної конструкції в залежності від висоти.

а) - частота 40 Гц; б) - частота 125 Гц

Таким чином, в другому розділі було показано, що ефективність шумозахисних екранів для транспортних потоків зі швидкостями руху до 180 км/год не залежить від швидкості, тому оцінка зниження рівнів звукового тиску екраном буде однакою як для рухомого так і для нерухомого джерела звуку. В другій частині розділу чисельними методами показано вплив звукоізоляції екрану на його ефективність який буде детально проаналізовано в наступних розділах.

Третій розділ присвячено дослідженню акустичного поля довкола екрану, що має щілини.

Так було розглянуто три задачі. Перша про знаходження акустичного поля довкола екрану, що має щілину в його основі (рис. 5)

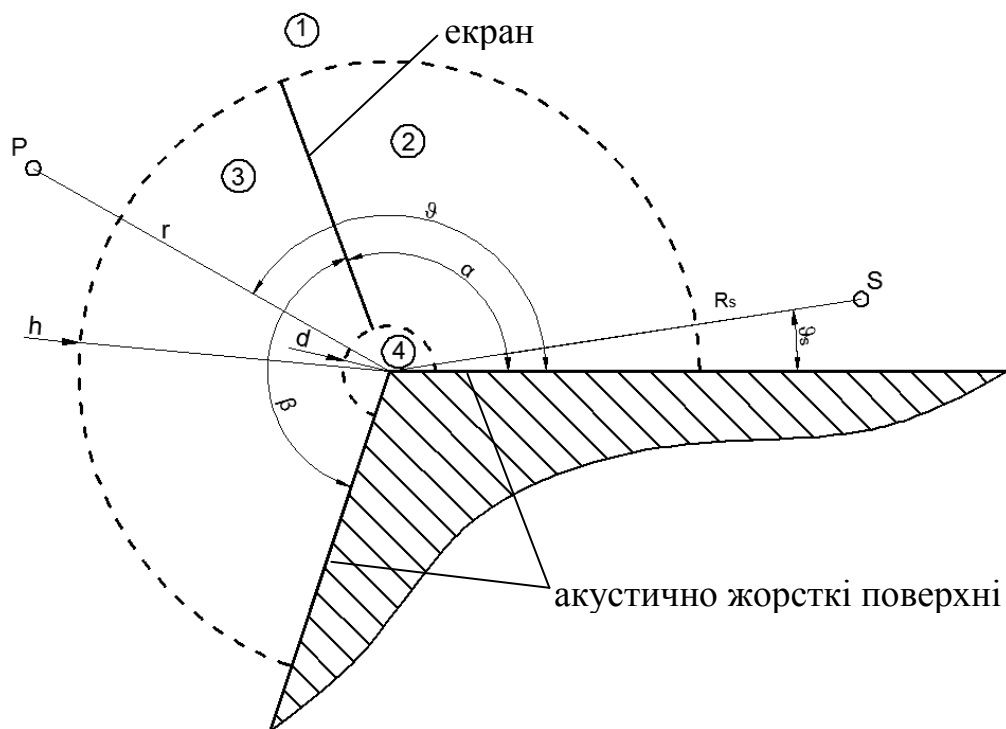


Рисунок 5 – Розрахункова геометрична модель звуковідбивного екрана з отвором в основі

Дану задачу розв'язано методом часткових областей.

Відповідно до даного методу вся область розв'язку поділено на 4 канонічні області:

- область **1** має вигляд області ззовні круга радіусом h , з такими граничними умовами:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \vartheta} = 0 \text{ при } \begin{cases} \vartheta = 0, r > h \\ \vartheta = \alpha + \beta, r > h \end{cases}, \quad (6)$$

- область **2** має вигляд сектора кільця радіуса d та h :

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \vartheta} = 0 \text{ при } \begin{cases} \vartheta = 0, r > d \\ \vartheta = \alpha, r \leq h \end{cases}, \quad (7)$$

- область **3** має вигляд сектора кільця радіуса d та h :

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \vartheta} = 0 \text{ при } \begin{cases} \vartheta = \alpha, r > d \\ \vartheta = \beta, r \leq h \end{cases}, \quad (8)$$

- область **4** має вигляд сектора круга радіуса d :

$$\frac{\partial \Phi}{\partial r} = 0 \text{ при } \begin{cases} \vartheta = 0, r \leq d \\ \vartheta = \alpha + \beta, r \leq d \end{cases}, \quad (9)$$

де α - кут нахилу екрана до горизонтальної площини дороги, β - кут між екраном та площиною за екраном (рис. 5).

Для знаходження акустичного поля необхідно розв'язати рівняння Гельмгольца яке в полярній системі координат має вид:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} - c^2 \left[\frac{1}{r} \left(\frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \vartheta^2} \right] = 0. \quad (10)$$

Частинний розв'язок представимо у формі:

$$\Phi_a(r, \gamma) = [A_a H_a^{(1)}(kr) + B_a H_a^{(2)}(kr)] \cdot [C_a \cos(a\vartheta) + D_a \sin(a\vartheta)], \quad (11)$$

або

$$\Phi_a(r, \vartheta) = [A_a J_a(kr) + B_a N_a(kr)] \cdot [C_a \cos(a\vartheta) + D_a \sin(a\vartheta)], \quad (12)$$

де $H_a^{(1)}$, $H_a^{(2)}$, J_a та N_a - позначення циліндричних функцій, Ганкеля 1-го і 2-го роду, Бесселя та Неймана відповідно,

A_a , B_a , C_a , D_a - невідомі коефіцієнти,

$k = \omega / c$ - хвильове число.

Враховуючи умову випромінювання Зоммерфельда на нескінченності було отримано вирази, що описують потенціал швидкості в кожній із областей :

$$\Phi_1 = \sum_{n=0}^{\infty} A_n^{(1)} \cdot \frac{H_{\frac{\pi n}{\alpha+\beta}}^{(1)}(kr)}{H_{\frac{\pi n}{\alpha+\beta}}^{(1)'}(kh)} \cos\left(\frac{\pi n}{\alpha+\beta} \vartheta\right); \quad \Phi_2 = \sum_{n=0}^{\infty} \left[A_n^{(2)} \cdot \frac{J_{\frac{\pi n}{\alpha}}(kr)}{J_{\frac{\pi n}{\alpha}}'(kh)} + A_n^{(3)} \cdot \frac{N_{\frac{\pi n}{\alpha}}(kr)}{N_{\frac{\pi n}{\alpha}}'(kh)} \right] \cos\left(\frac{\pi n}{\alpha} \vartheta\right). \quad (13)$$

$$\Phi_3 = \sum_{n=0}^{\infty} \left[A_n^{(4)} \cdot \frac{J_{\frac{\pi n}{\beta}}(kr)}{J_{\frac{\pi n}{\beta}}'(kh)} + A_n^{(5)} \cdot \frac{N_{\frac{\pi n}{\beta}}(kr)}{N_{\frac{\pi n}{\beta}}'(kh)} \right] \cos\left(\frac{\pi n}{\beta} (\vartheta - \alpha)\right); \quad \Phi_4 = \sum_{n=0}^{\infty} A_n^{(6)} \cdot \frac{J_{\frac{\pi n}{\alpha+\beta}}(kr)}{J_{\frac{\pi n}{\alpha+\beta}}'(kd)} \cos\left(\frac{\pi n}{\alpha+\beta} \vartheta\right)$$

А також записано дифракційне поле від джерела звуку:

$$\Phi_0 = \frac{\pi i}{2(\alpha+\beta)} \begin{cases} \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n \frac{H_{\frac{\pi n}{\alpha+\beta}}^{(1)}(kR_s) J_{\frac{\pi n}{\alpha+\beta}}(kr)}{\alpha+\beta} \cos\left(\frac{\pi n}{\alpha+\beta} \vartheta_s\right) \cos\left(\frac{\pi n}{\alpha+\beta} \vartheta\right), & r < R_s \\ \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n \frac{H_{\frac{\pi n}{\alpha+\beta}}^{(1)}(kr) J_{\frac{\pi n}{\alpha+\beta}}(kR_s)}{\alpha+\beta} \cos\left(\frac{\pi n}{\alpha+\beta} \vartheta_s\right) \cos\left(\frac{\pi n}{\alpha+\beta} \vartheta\right), & r \geq R_s \end{cases}.$$

Використовуючи умови спряження на границях полів:

- за тиском:

$$\begin{aligned} \Phi_1 + \Phi_0 &= \Phi_2 + \Phi_3, & r &= h; \\ \Phi_4 &= \Phi_2 + \Phi_3, & r &= d; \end{aligned} \quad (14)$$

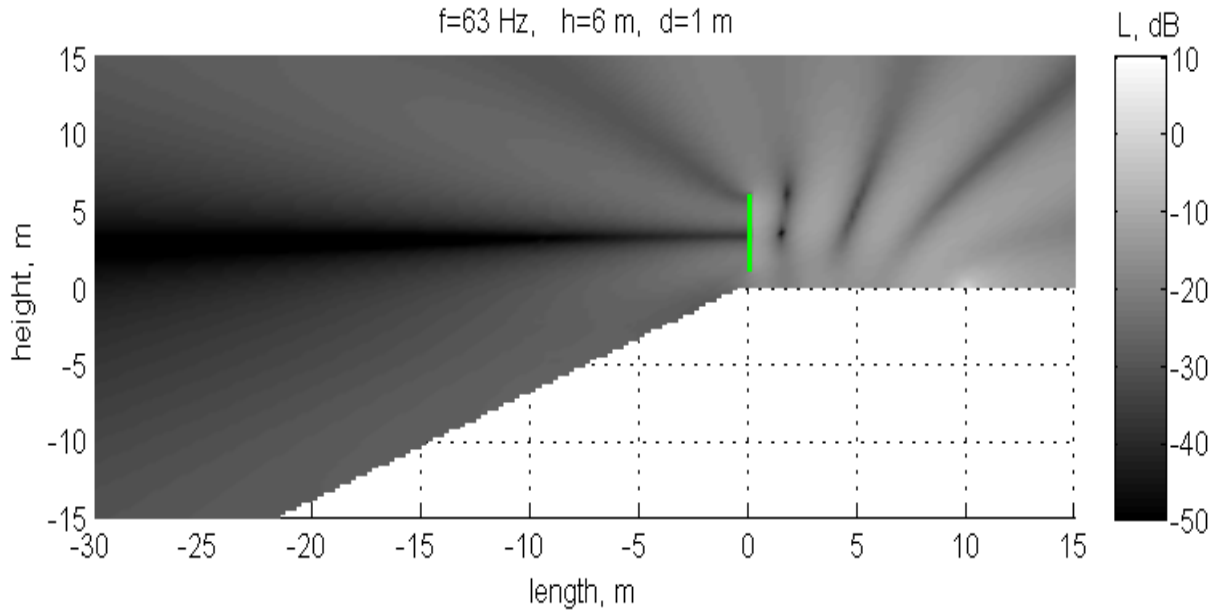
-за швидкістю:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\Phi_1 + \Phi_0)}{\partial r} &= \begin{cases} \frac{\partial \Phi_2}{\partial r}, & r = h, \quad \vartheta \in [0, \alpha] \\ \frac{\partial \Phi_3}{\partial r}, & r = h, \quad \vartheta \in [\alpha, \beta] \end{cases}; \\ \frac{\partial \Phi_4}{\partial r} &= \begin{cases} \frac{\partial \Phi_2}{\partial r}, & r = d, \quad \vartheta \in [0, \alpha] \\ \frac{\partial \Phi_3}{\partial r}, & r = d, \quad \vartheta \in [\alpha, \beta] \end{cases}, \end{aligned} \quad (15)$$

та провівши алгебраїзацію функціональних співвідношень з використанням властивості ортогональності тригонометричних функцій отримано нескінченну систему рівнянь, що розв'язувалася методом редукції

$$\begin{aligned}
 & \sum_{m=0}^{\infty} A_m^{(1)} \cdot \frac{H_{\frac{\pi m}{\alpha+\beta}}^{(1)}(kh)}{H_{\frac{\pi m}{\alpha+\beta}}^{(1)'}(kh)} \cdot I_{1m} - \sum_{m=0}^{\infty} \left[A_m^{(2)} \cdot \frac{J_{\frac{\pi m}{\alpha}}(kh)}{J_{\frac{\pi m}{\alpha}}'(kh)} + A_m^{(3)} \frac{N_{\frac{\pi m}{\alpha}}(kh)}{N_{\frac{\pi m}{\alpha}}'(kh)} \right] I_{2m} - \sum_{m=0}^{\infty} \left[A_m^{(4)} \cdot \frac{J_{\frac{\pi m}{\beta}}(kh)}{J_{\frac{\pi m}{\beta}}'(kh)} + A_m^{(5)} \frac{N_{\frac{\pi m}{\beta}}(kh)}{N_{\frac{\pi m}{\beta}}'(kh)} \right] I_{3m} = \dots \\
 & = -\frac{\pi i}{2(\alpha+\beta)} \sum_{m=0}^{\infty} \varepsilon_m H_{\frac{\pi m}{\alpha+\beta}}^{(1)}(kR_s) J_{\frac{\pi m}{\alpha+\beta}}(kh) \cos\left(\frac{\pi m}{\alpha+\beta} g_s\right) I_{1m} \\
 & \sum_{m=0}^{\infty} \left[A_m^{(2)} \cdot \frac{J_{\frac{\pi m}{\alpha}}(kd)}{J_{\frac{\pi m}{\alpha}}'(kh)} + A_m^{(3)} \frac{N_{\frac{\pi m}{\alpha}}(kd)}{N_{\frac{\pi m}{\alpha}}'(kh)} \right] I_{2m} + \sum_{m=0}^{\infty} \left[A_m^{(4)} \cdot \frac{J_{\frac{\pi m}{\beta}}(kd)}{J_{\frac{\pi m}{\beta}}'(kh)} + A_m^{(5)} \frac{N_{\frac{\pi m}{\beta}}(kd)}{N_{\frac{\pi m}{\beta}}'(kh)} \right] I_{3m} - \sum_{n=0}^{\infty} A_m^{(6)} \cdot \frac{J_{\frac{\pi m}{\alpha+\beta}}(kd)}{J_{\frac{\pi m}{\alpha+\beta}}'(kd)} I_{1m} = 0 \\
 & \left\{ \sum_{m=0}^{\infty} A_m^{(1)} I_{1m} - \sum_{m=0}^{\infty} [A_m^{(2)} + A_m^{(3)}] I_{2m} = -\frac{\pi i}{2(\alpha+\beta)} \sum_{m=0}^{\infty} \varepsilon_m H_{\frac{\pi m}{\alpha+\beta}}^{(1)}(kR_s) J_{\frac{\pi m}{\alpha+\beta}}'(kh) \cos\left(\frac{\pi m}{\alpha+\beta} g_s\right) I_{1m} \right. \\
 & \left. \sum_{m=0}^{\infty} A_m^{(1)} I_{1m} - \sum_{m=0}^{\infty} [A_m^{(4)} + A_m^{(5)}] I_{3m} = -\frac{\pi i}{2(\alpha+\beta)} \sum_{m=0}^{\infty} \varepsilon_m H_{\frac{\pi m}{\alpha+\beta}}^{(1)}(kR_s) J_{\frac{\pi m}{\alpha+\beta}}'(kh) \cos\left(\frac{\pi m}{\alpha+\beta} g_s\right) I_{1m} \right. \\
 & \left. \sum_{m=0}^{\infty} \left[A_m^{(2)} \cdot \frac{J_{\frac{\pi m}{\alpha}}'(kd)}{J_{\frac{\pi m}{\alpha}}'(kh)} + A_m^{(3)} \frac{N_{\frac{\pi m}{\alpha}}'(kd)}{N_{\frac{\pi m}{\alpha}}'(kh)} \right] I_{4m} - \sum_{m=0}^{\infty} A_m^{(6)} I_{5m} = 0 \right. \\
 & \left. \sum_{m=0}^{\infty} \left[A_m^{(4)} \cdot \frac{J_{\frac{\pi m}{\beta}}'(kd)}{J_{\frac{\pi m}{\beta}}'(kh)} + A_m^{(5)} \frac{N_{\frac{\pi m}{\beta}}'(kd)}{N_{\frac{\pi m}{\beta}}'(kh)} \right] I_{6m} - \sum_{m=0}^{\infty} A_m^{(6)} I_{7m} = 0 \right. \quad (16)
 \end{aligned}$$

На рис. 6 показано результат розв'язку системи рівнянь для частоти 63 Гц та екрану висотою 6 м з щілиною 1 м. При цьому джерело звуку знаходиться на горизонтальній поверхні на відстані 10 м.



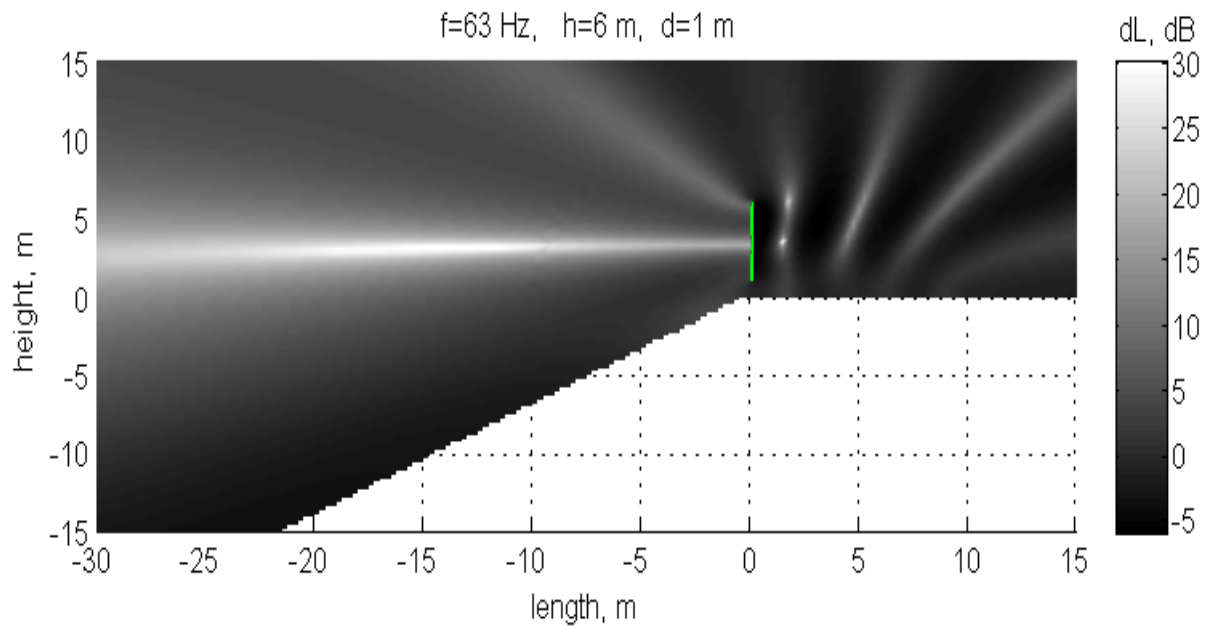


Рисунок 6 – Акустичне поле та ефективність акустично жорсткого екрану висотою 6 м з отвором 1 м в основі

а) – акустичне поле довкола екрану; б) – різниця звукових тисків з екраном та без екрану

Як показують результати розрахунків при тональному джерелі звуку спостерігається яскраво виражена інтерференційна картина як перед екраном так і за екраном.

Друга задача полягала в знаходженні звукового поля довкола екрану і щілиною в середній частині екрану (рис. 7).

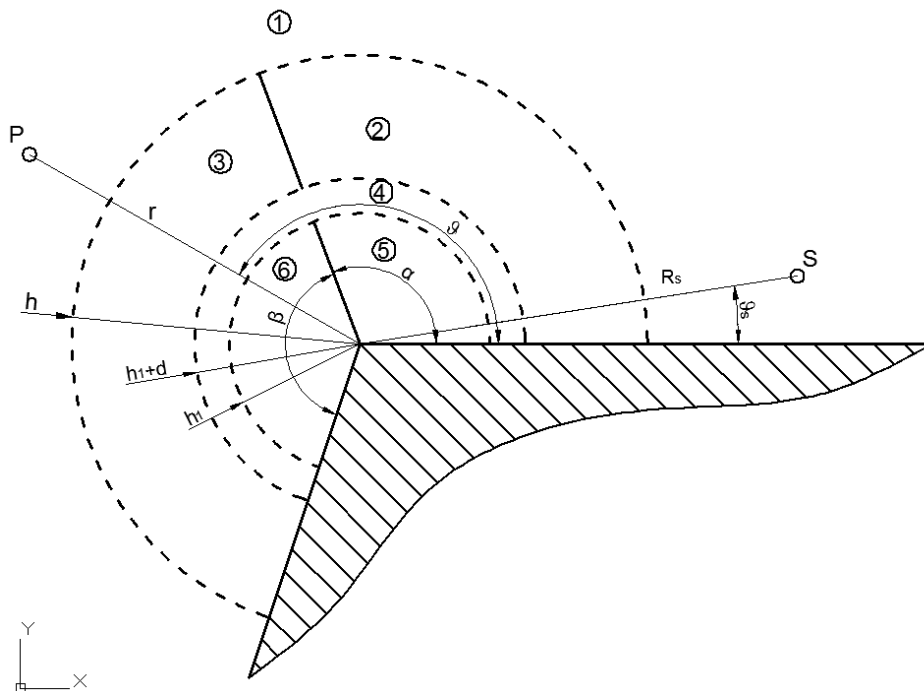


Рисунок 7 – Розрахункова геометрична модель звуковідбивного екрану з отвором по середині

Все поле розбивалося на 6 канонічних областей для яких також був побудований розв'язок, що привів до нескінченної системи алгебраїчних рівнянь, яка розв'язувалася методом редукції:

На рис. 8 показано результат розв'язку системи рівнянь для частоти 63 Гц та екрану висотою 6 м з отвором 1 м, що розташовано на висоті 2 м.

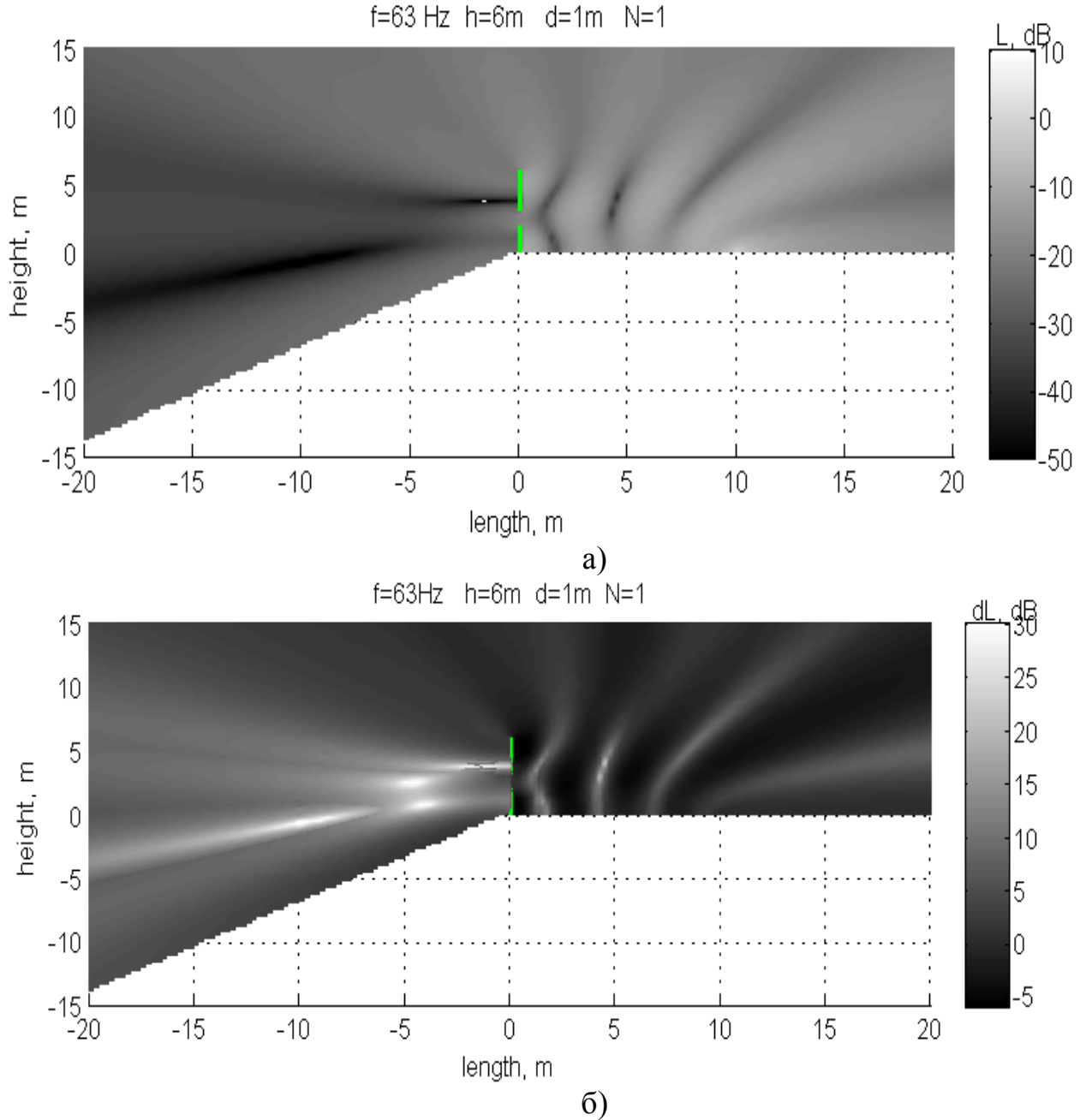


Рисунок 8 – Акустичне поле та ефективність акустично жорсткого екрану висотою 6 м з отвором 1 м на висоті 2 м:

а) – акустичне поле довкола екрана; б) – поле ефективності екрана

Третя задача полягала в знаходженні звукового поля довкола екрана з великою кількістю щілин (рис. 9)

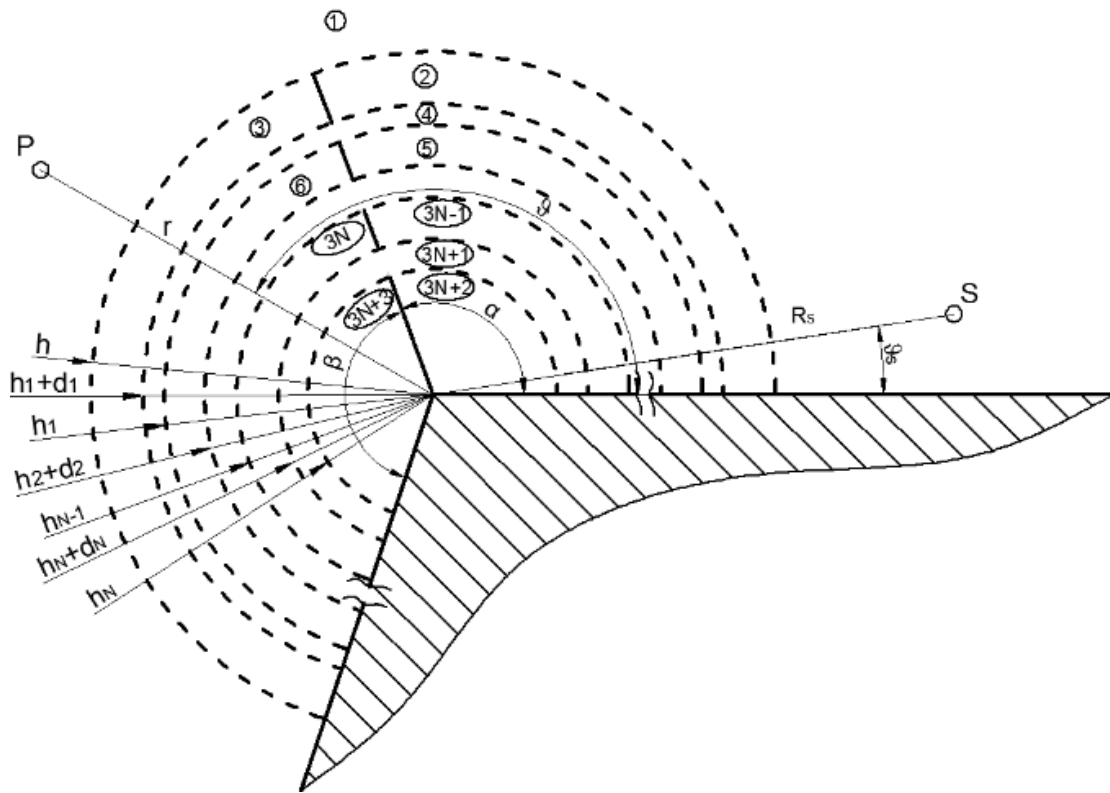


Рисунок 9 – Розрахункова геометрична модель звуковідбивного екрана з кількома щілинами

Така задача також була успішно розв’язана методом часткових областей. Для N щілин, кількість таких областей становила $3N+3$.

В результаті розв’язку даної задачі було побудовано звукові поля довкола екрана з 5-ма щілинами по 0,2 м кожна (рис. 10)

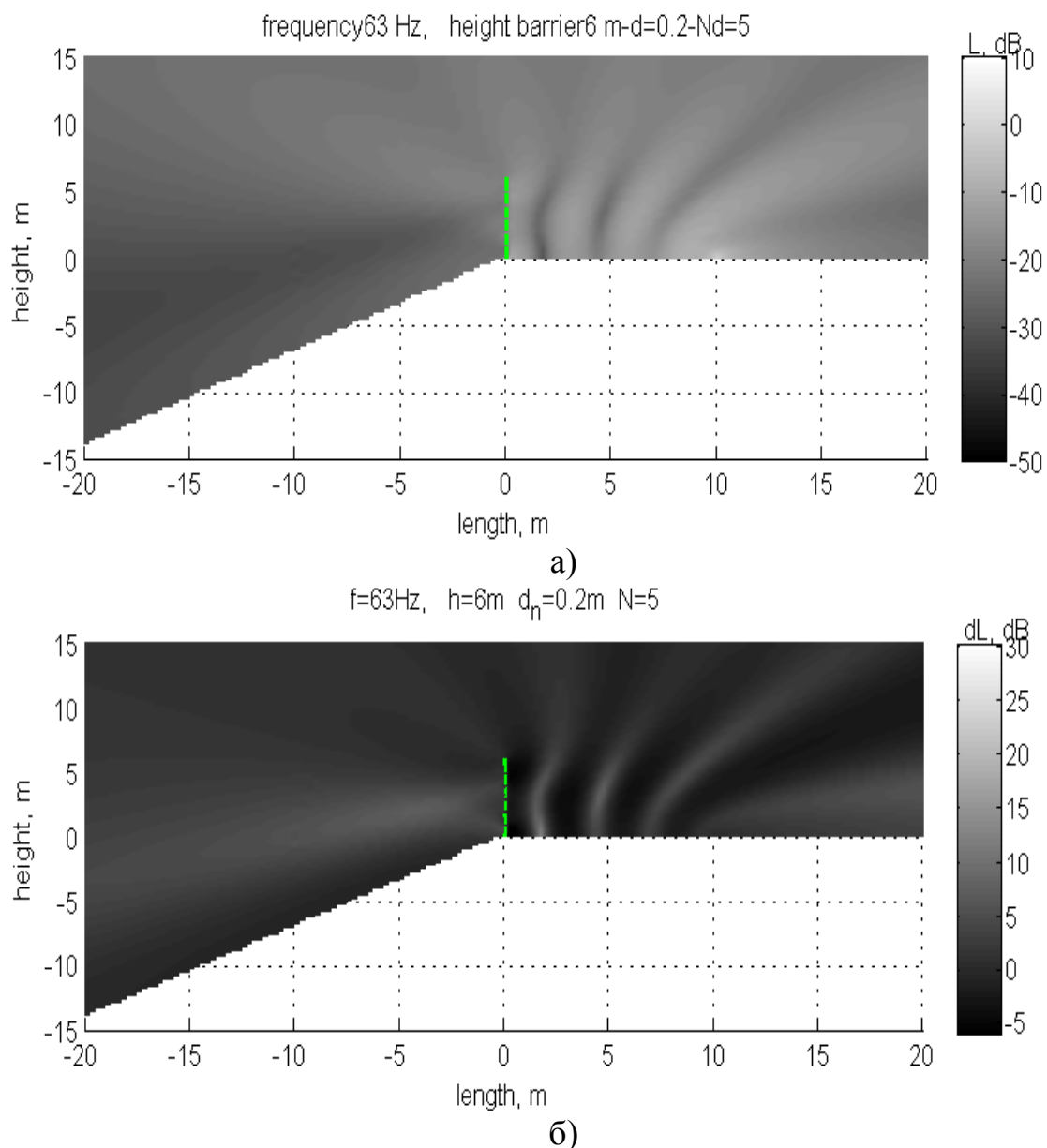


Рисунок 10 – Акустичне поле та ефективність акустично жорсткого екрану висотою 6 м з 5-ма отворами шириною 0,2 м:

а) – акустичне поле довкола екрана; б) – поле ефективності екрана

Таким чином, в даному розділі поставлено та розв'язано три задачі по знаходженню акустичного поля довкола жорсткого екрану з щілинами, що дозволило оцінити ефективність таких екранів. Показано що наявність щілин до 0,5 см не призводить до погіршення ефективності екрану.

Четвертий розділ присвячено моделюванню та експериментальним дослідженням, що були проведені для перевірки отриманих в передньому розділі теоретичних результатів.

Для оцінки звукоізоляційних властивостей акустично жорстких екранів зі щілинами було використано відомий вираз для знаходження результуючої звукоізоляції конструкції, що складається з кількох елементів:

$$R'_{\text{рез}} = -10 \lg \left(\frac{1}{S_K} \sum_{i=1}^m S_i \cdot 10^{-0,1 R'_i} \right), \quad (17)$$

де S_K загальна площа складеної огорожувальної конструкції, м^2 ;

S_i – площа i -го елемента складеної огорожувальної конструкції, м^2 ;

R'_i – ізоляція повітряного шуму i -им елементом складеної огорожувальної конструкції, дБ;

m – кількість елементів складеної огорожувальної конструкції з різною звукоізоляцією.

Даний вираз дозволив отримати формулу для оцінки звукоізоляції екрану з кількома щілинами:

$$R_{\text{екр,щ}} = 10 \lg \left(\frac{h_{\text{екр}}}{h_{\text{щ}}} \right), \quad (18)$$

де $R_{\text{екр,щ}}$ – результуюча звукоізоляція екрану з щілиною ,

$h_{\text{екр}}$ – висота екрану, м;

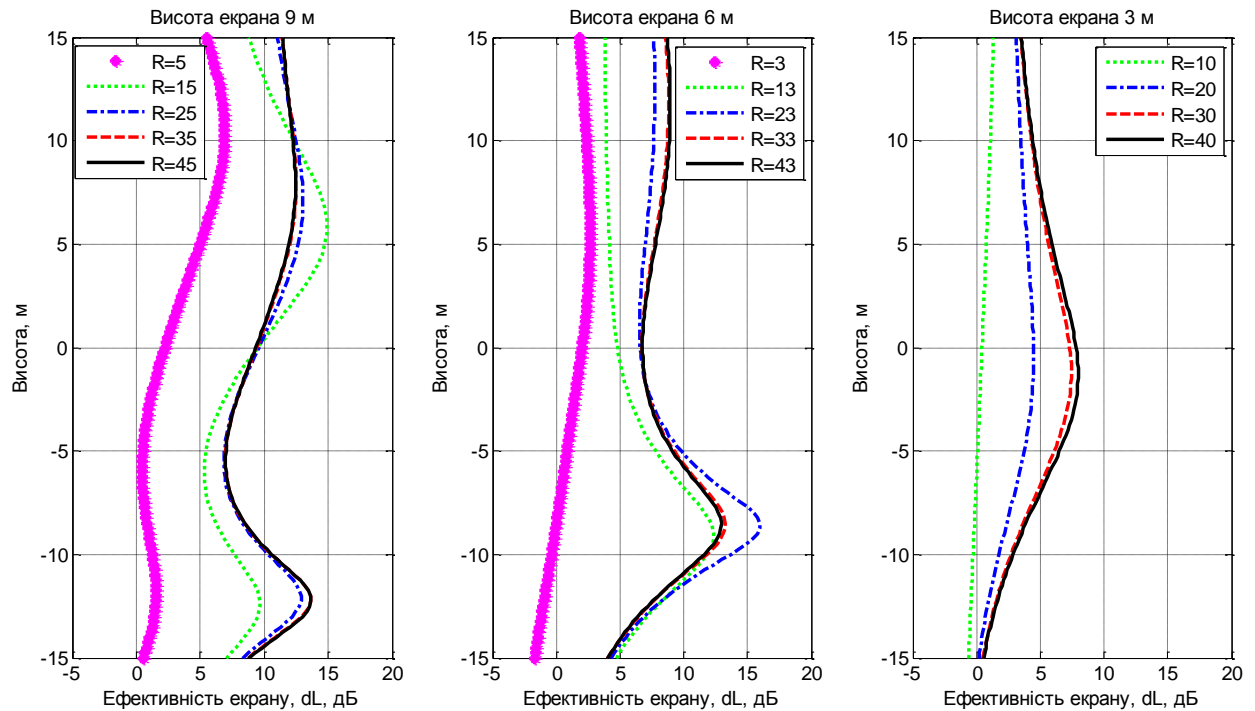
$h_{\text{щ}}$ – сумарна ширина (висота) всіх щілин екрану, м.

Транспортний потік випромінює шумовий сигнал з неперервним спектром і тому проведення аналізу звукових полів для тональних сигналів є не досить коректним. Відповідно до нормативних документів, розрахунок рівнів звукового тиску та аналіз ефективності засобів зниження шуму, якими є шумозахисні екрани проводиться в октавних смугах частот.

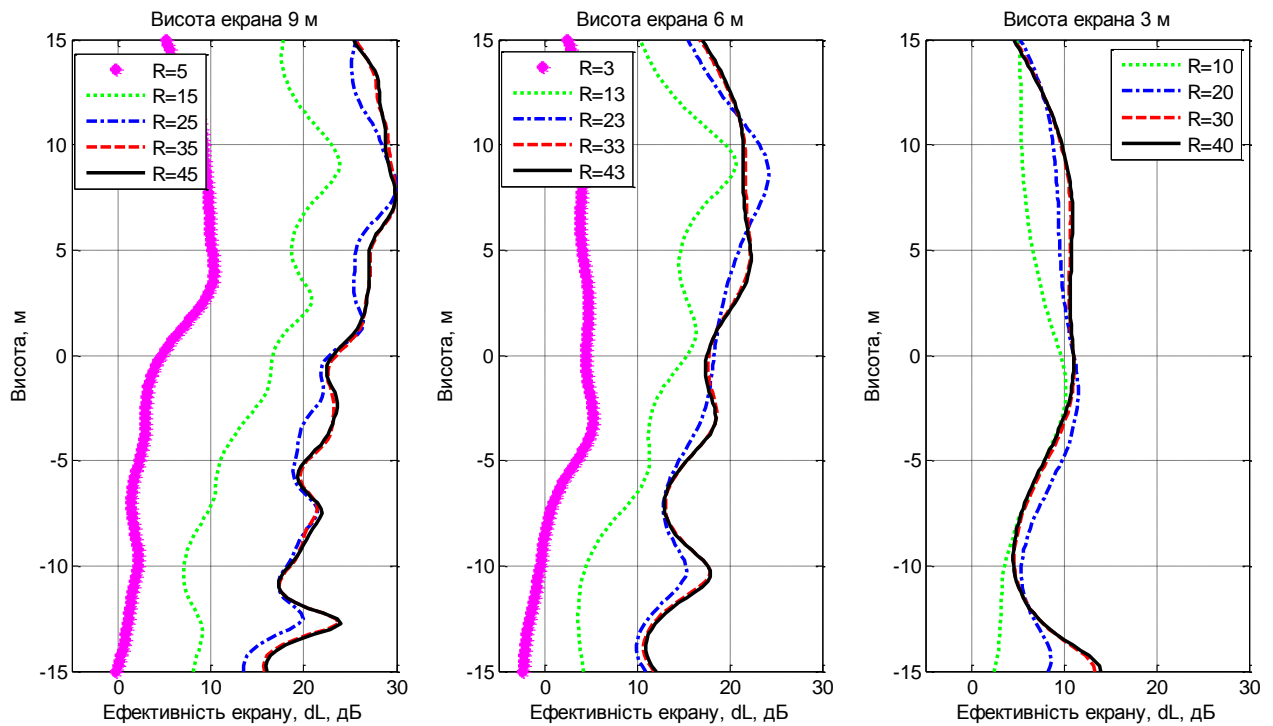
Тому для наближення математичної моделі до реальної ситуації необхідно переходити до шумового сигналу. Акустичне поле шумового сигналу можливо отримати шляхом додавання енергетичних параметрів звуку тональних сигналів з близькими частотами.

Шляхом проведення числового експерименту встановлено, що при додаванні 15 гармонік, які рівномірно (за «геометричним» законом) розподілені в одній октавній смузі частот, вдається отримати звукове поле, яке за своїми характеристиками наближається до поля шумового сигналу в октавній смузі частот.

Враховуючи вище наведені міркування була побудована комп'ютерна програма, що дозволила провести розрахунки акустичної ефективності вертикальних екранів висотою 3 м, 6 м та 9 м з різною звукоізоляцією



а)



б)

Рисунок 11 – Вплив звукоізоляції екрана на його ефективність за різних висот екрану та частоти звуку: а) – 63 Гц; б) – 250 Гц

Для перевірки отриманих математичних результатів були проведені експериментальні дослідження ефективності шумозахисних екранів з визначенням їх звукоізоляції.

Так для шумозахисного екрану на Дарницькому мосту в м. Київ з врахуванням наявних щілин власна звукоізоляція екрану в області низьких частот (63 Гц – 500 Гц) становила близько 10 дБ. Результати розрахунку з урахуванням вказаної звукоізоляції та експериментальні дослідження подано на рис. 12

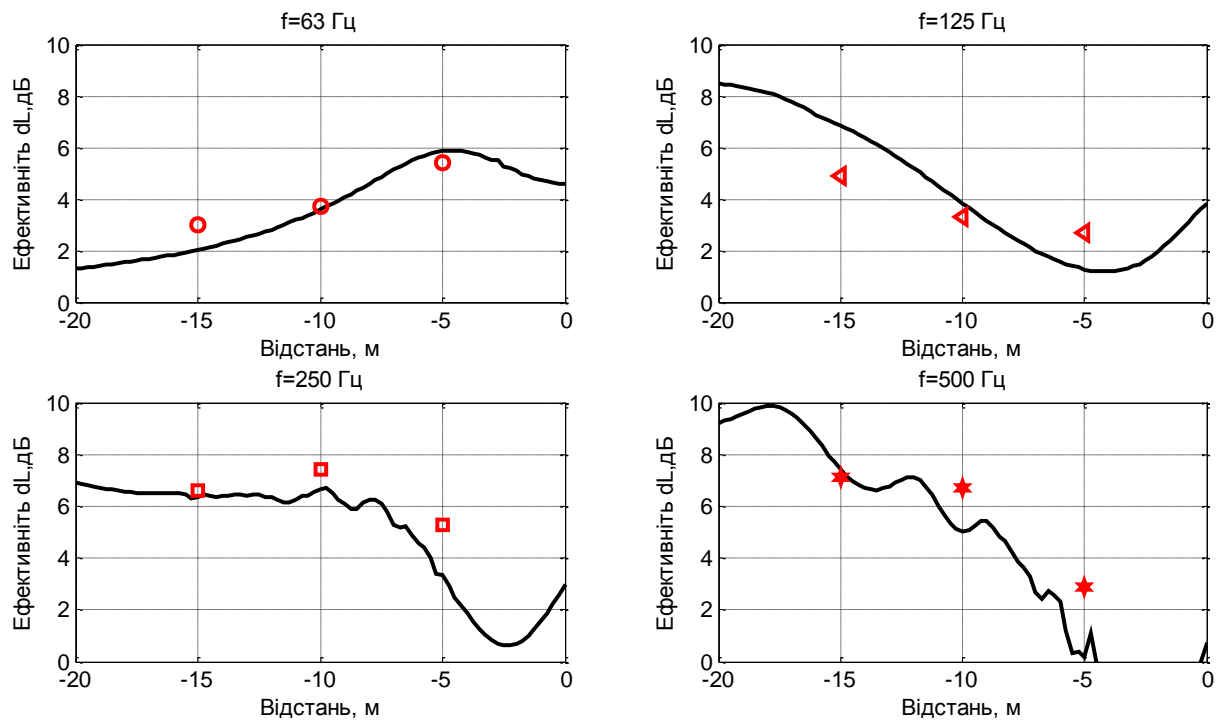


Рисунок 12– Порівняння результатів розрахунку та результатів вимірювання на рівні $h=-3$ м від дороги

Результати порівняння результатів розрахунку екрану з кінцевою звукоізоляцією з результатами натурних вимірювань показують, що похибка в результатах лежить в межах ± 2 дБ, що є непоганим результатом з огляду на те що в будівельній акустиці похибка в ± 5 дБ є прийнятною.

Ще один екран було досліджено на трасі Київ-Чоп, власна звукоізоляція якого також була досліджена в лабораторних умовах, та змінювалась в межах 20-27 дБ для частот 63 – 500 Гц. Результати розрахунку для екрану з вище наведеною звукоізоляцією та екрану з нескінченною звукоізоляцією та результати натурних вимірювань наведені на рис. 13

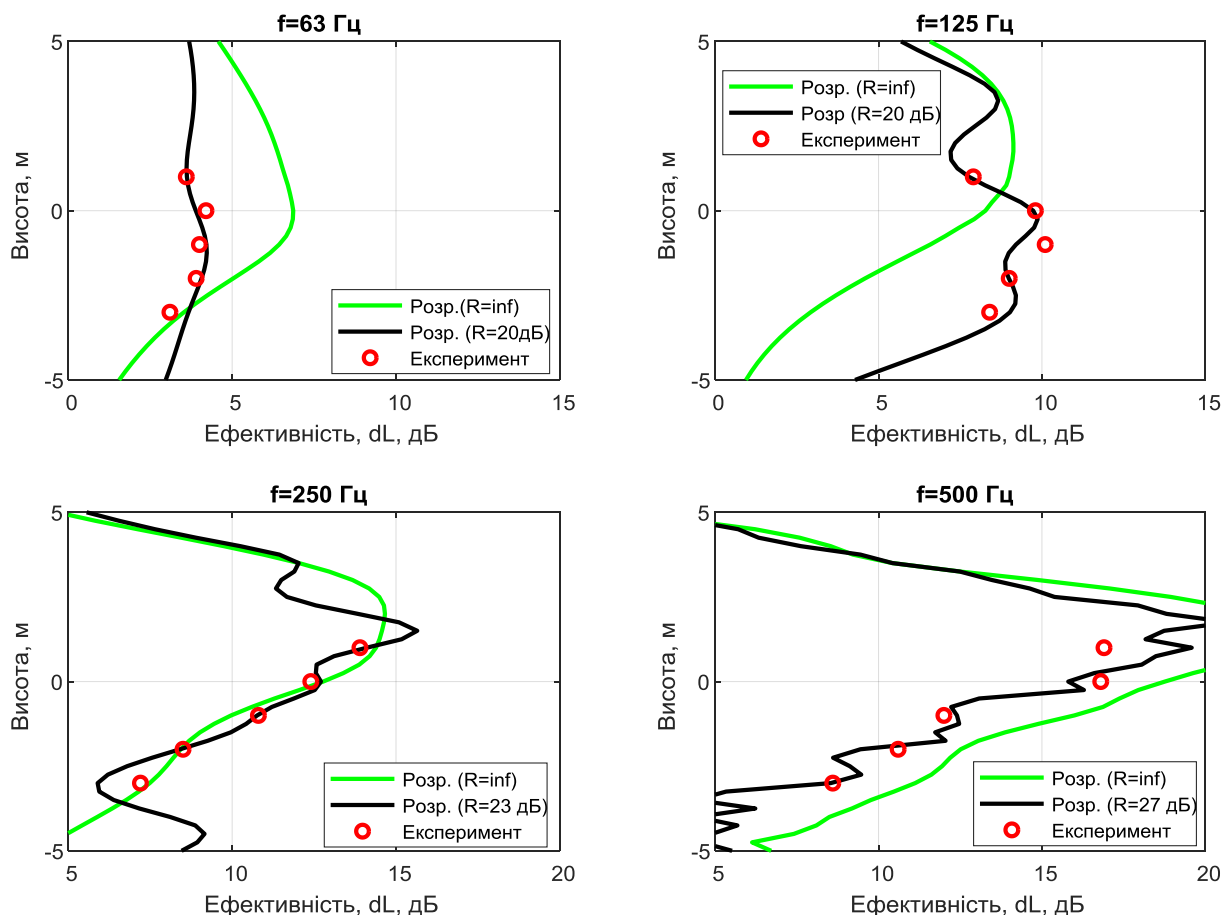


Рисунок 13 – Результати порівняння ефективності екранів з нескінченною звукоізоляцією та звукоізоляцією, що відповідала реальному екрану

Експериментальні результати та результати розрахунку свідчать про те, що врахування звукоізоляції призводить до наближення результатів розрахунку до експериментальних даних. Розбіжність результатів експерименту та розрахунку без урахування звукоізоляції становить ± 5 дБ в той час як при врахуванні звукоізоляції - $\pm 1,5$ дБ.

Таким чином в розділі 4 проведено порівняння комп'ютерного моделювання екрану зі щілинами та екрану та зроблено порівняння з результатами натурних експериментів. Виявлено, що врахування власної звукоізоляції екрану призводить до покращення збігу результатів між розрахунковими значеннями та отриманими експериментально в натурних умовах.

ВИСНОВКИ

1. Поставлена та розв'язана задача знаходження ефективності шумозахисного екрану зі щілиною в його основі, яка дозволяє оцінити ефективність побудованих шумозахисних екранів в Україні та тих, що проектується. Визначено вплив щілини між екраном і землею на ефективність екрану та надані практичні рекомендації до максимально можливого розміру щілини;

2. Поставлена та розв'язана задача знаходження звукового поля довкола нескінченно довгого шумозахисного екрана з перфорацією, що дозволяє оцінити максимальні розміри щілини між різними елементами екрану, які не призведуть до суттєвого погіршення його ефективності в широкому діапазоні частот;
3. Запропоновано модель екрану зі скінченною звукоізоляцією у вигляді перфорованого акустично жорсткого екрану, яка показала суттєвий вплив звукоізоляції екрана на його ефективність. Такий результат разом з відомими методами розрахунку власної ізоляції різних за конструкцією екранів дозволяє прогнозувати очікувану ефективність конструкції реальних екранів;
4. Запропоновано використовувати метод кінцевих елементів для знаходження рівнів звукового тиску від рухомого джерела звуку довкола шумозахисного екрану, який показав, що ефективність шумозахисного екрану змінюється лише в межах 1,1 дБ для швидкостей руху до 180 км/год, що погоджується з результатами отриманими аналітичним шляхом.
5. Метод кінцевих елементів, що було використано для комп'ютерного моделювання дав змогу оцінити залежність між звукоізоляцією та ефективністю шумозахисного екрана в більш ширшому діапазоні частот. Були проведені розрахунки зниження рівнів шуму екранами з литого полікарбонату товщинами 5 мм, 10 мм та 20 мм; сталі 1 мм, 2 мм та 5 мм та цегли 125 мм та 250 мм. Однак за необхідності отримати точні значення ефективності, доцільно використовувати метод часткових областей;
6. Одержані якісні оцінки ефективності шумозахисних екранів з кінцевою звукоізоляцією в широкому діапазоні частот та розмірів екрана:
 - зі зменшенням розміру щілини ефективність екрана монотонно зростає й наближається до ефективності акустично жорсткого екрану;
 - розміщення щілини суттєво не впливає на його ефективність, суттєвими є лише її розмір та частота звуку;
 - для шумозахисних екранів достатньою є звукоізоляція $R=30$ дБ;
7. Експериментальні дослідження в натурних умовах підтвердили результати, які були отримані за допомогою аналітичного методу часткових областей:
 - зменшення ефективності екрана спостерігається за умови коли ширина щілини є більшою ніж $\frac{1}{4}$ довжини звукової хвилі;
 - розбіжність між експериментальними результатами та значеннями отриманими методом часткових областей з урахуванням кінцевої звукоізоляції екрана становить 1,5 - 2 дБ.

Список опублікованих праць за темою дисертації:

1. Заєць В.П., Котенко С.Г., Осипчук Л.Н., Трохименко Н.О. Ефективність шумозахисних екранів кінцевої звукоізоляції // Будівельні матеріали, виробни та санітарна техніка. – 2012. – №. 46. – С. 107-111., м.Київ.
Особистий внесок здобувача полягає в проведенні розрахунків параметрів

2. Котенко С. Г. Измерение акустических свойств шумозащитного экрана в г. Харькове //Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – Т. 6. – №. 10. – С. 64-67., м. Харків. (*Index Copernicus*)
3. Котенко С. Г. Про акустичний комфорт малих придорожніх готелів //Системи обробки інформації. – 2014. – №. 7. – С. 32-40.
4. Заец В.П., Котенко С.Г., Трохименко М.П., Шумозахисні екрани в Україні: помилки проектування та будівництва // Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка. – 2014. – №. 52. – С. 14-17., Київ. *Особистий внесок здобувача полягає в проведенні розрахунків параметрів*
5. Заець В. П., Котенко С. Г. Звук рухомого точкового джерела //Електроніка та Зв'язок. – 2015. – Т. 20. – №. 4. – С. 89-93. *Особистий внесок здобувача полягає в проведенні порівняння параметрів експерименту*
6. Авдєєв О. В., Заець В. П., Котенко С. Г. Комп'ютерне моделювання коливань дзвону //Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – 2015. – Т. 49. – С. 164-169. *Особистий внесок здобувача полягає в проведенні аналізу результатів*
7. V. Zaets, S. Kotenko. Investigation of the efficiency of a noise protection screen with an opening at its base. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol.5. – N5(89). – 2017. p.–4-11. *Особистий внесок здобувача полягає в проведенні розрахунків параметрів (Scopus)*
8. Дідковський В.С., Котенко С.Г. Ефективність шумозахисних екранів на мостах. Міжнародна наукова конференція " II Міжнародній науково-практичній конференції «Перспективні шляхи розвитку наукових знань»– Київ, січень 2019. *Особистий внесок здобувача полягає в проведених розрахунках та аналізі результатів*
9. Погребняк А., Котенко С.Г. «Вплив звукоізоляції на акустичну ефективність шумозахисного екрана» ELCONF-2015, стр.28-31 <http://elconf.ieee.org.ua/>. *Особистий внесок здобувача полягає в проведенні розрахунків параметрів та порівняння методик*
10. Погребняк А.О., Котенко С.Г. «Шумозахисні екрани з кінцевою звукоізоляцією». Матеріали XLII Міжнародна науково-практична конференція «Пріоритетні напрями наукових досліджень», Чернівці 15-16 червня 2016. – Т.1. – Київ: Науково-видавничий центр «Лабораторія думки», 2016.-с.8-12. *Особистий внесок здобувача полягає в проведенні розрахунків параметрів*
11. Поторжицький В.В., Котенко С.Г., Заець В.П., Патент на корисну модель №108733 «Шумозахисний екран», 2016. *Особистий внесок здобувача полягає в проведенні патентних досліджень та розробці опису винаходу.*
12. Заець В.П., Котенко, С.Г., Теленга А.О Патент на корисну модель №79889 «Шумозахисний екран», 2018. *Особистий внесок здобувача полягає в розробці опису винаходу та визначенні формули.*

АНОТАЦІЯ

Котенко С.Г. Зниження рівнів шуму рухомих джерел шумозахисними екранами з кінцевої звукоізоляцією. - На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.08 - прикладна акустика та звукотехніка. - Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", МОН України, Київ, 2019.

Дисертація присвячена вирішенню актуального завдання - визначення закономірностей зміни ефективності шумозахисних екранів від їх конструктивних параметрів і геометричного розташування, пошуку шляхів збільшення їх ефективності.

В роботі запропонована нова математична модель шумозахисного екрану з кінцевої звукоізоляцією. Для вирішення завдання використовувався метод часткових областей. Що дозволило визначити акустичне поле навколо екрану та оцінити зниження звукового тиску екраном.

Були проведені натурні та експериментальні дослідження, які показали високу точність кореляції з моделлю.

Результати дисертації використовувалися під час виконання розрахункових робіт, при розробці рекомендацій для проектування шумозахисних екранів на території України та підготовленні рекомендації до впровадження змін в державні стандарти.

Ключові слова: ефект Допплера, екран зі щілиною, кінцева звукоізоляція, ефективність шумозахисного екрана, зниження звукового тиску.

АННОТАЦИЯ

Котенко С. Снижение уровней шума движущихся источников шумозащитными экранами с конечной звукоизоляцией. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.08 - прикладная акустика и звукотехника. - Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского", МОН Украины, Киев, 2019.

Диссертация посвящена решению актуальной задачи определения закономерностей изменения эффективности шумозащитных экранов от их конструктивных параметров и геометрического расположения, поиска путей увеличения их эффективности.

В работе предложена новая математическая модель шумозащитного экрана с конечной звукоизоляцией. Для решения задачи использовался метод частичных областей. Что позволило определить акустическое поле вокруг экрана и оценить снижение звукового давления экраном.

Были проведены натурные и экспериментальные исследования, которые показали высокую точность корреляции с моделью.

Результаты диссертации использовались при выполнении расчетных работ, при разработке рекомендаций для проектирования шумозащитных экранов на территории Украины и подготовлены рекомендации к внедрению изменений в государственные стандарты.

Ключевые слова: эффект Допплера, экран со щелью, конечная звукоизоляция, эффективность шумозащитного экрана, снижение звукового давления.

ABSTRACT

Kotenko, S. G. "Reducing of noise levels from moving sources by acoustic shields with ultimate acoustic insulation". Published as manuscript.

Candidate of Technical Sciences dissertation, specialty 05.09.08. Applied acoustics and acoustic engineering, the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute," the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2019.

The dissertation is dedicated to solution of the actual problem: determination of patterns of change in the effectiveness of acoustic shields from their design parameters and geometric location, searching for ways to increase their effectiveness. To do this, we have analyzed all currently available methods, compared them, and identified their drawbacks.

Since the technical requirements for the operation of shields require technical gaps, the task of finding the effectiveness of an acoustic shield with a gap at its basis has been set and solved in the paper for the first time; the problem of finding the acoustic field around the infinitely long acoustic shield with perforation has been set and solved for the first time; the model of the acoustic shield with the ultimate acoustic insulation in the form of a perforated acoustically-hard shield has been suggested for the first time; the computer modeling of the acoustic shield was improved with the help of the finite-element method for finding the levels of sound pressure of a moving sound source around the acoustic shield; a high quality evaluation of the effectiveness of acoustic shields with ultimate acoustic insulation in a wide range of frequencies and sizes of acoustic shields has been obtained.

The paper offers a new mathematical model of acoustic shield with ultimate acoustic insulation. To solve the problem, the method of partial areas was used. This made it possible to determine the acoustic field around the shield and estimate the decrease in the sound pressure by the shield.

The full-scale investigation and experimental studies were conducted that showed high accuracy of the correlation with the model.

A new method for calculating the acoustic insulation of shields was developed, using holes and gaps in the shield body. Numerous values and comparisons of using different sizes of gaps in the shield body have been presented in the paper, which allows editing the value of the soundproofing properties of the materials. As we know, the soundproofing properties affect the overall effectiveness of the shield. Also, the calculations and comparison of shields with different acoustic insulation have helped identify that the shield's acoustic self-insulation of more than 38 dB is

equal to an absolutely hard shield. This allows us to conclude that it is not necessary to invest extra money in highly insulating materials to increase the effectiveness of the shield. The effectiveness is rather influenced by geometric dimensions.

The paper also presents numerical calculations of the shield effectiveness, depending on their geometric dimensions. They make it clear that the higher the height, the greater the effectiveness of the shield. One can also see that three-meter-high shields have very low effectiveness. Therefore, the uselessness of using shields of such height on a flat terrain has been proven.

In the paper, the computer software for calculation of the effectiveness of acoustic shields has been improved. The improved version takes into account the gap and the acoustic self-insulation of the shield body.

The practical importance of the results obtained is in the use of acoustic shields with a hole in their basis, in the assessment of the acoustic properties of the shields with ultimate acoustic insulation, in the establishment of quantitative relationships between the geometric parameters of the acoustic shield and its effectiveness, and in taking them into account in the acoustic design of acoustic shields.

The results of the dissertation were used in calculation work during development of recommendations for design of acoustic shields in Ukraine. Also, recommendations for introduction of changes in state standards were developed.

Keywords: Doppler Effect, shield with a gap, ultimate acoustic insulation, acoustic shield effectiveness, sound pressure reduction, noise protection, noise maps.